南疆地区水资源承载力及子系统耦合协调性时空格局

赵豫芝， 杨建军

（新疆大学生态与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘 要：南疆地区先天缺水和后天用水的供需矛盾源于自然经久的积累和生产活动对生态环境的影响及破坏，改善供、需水的矛盾需制定科学完善的用水方案。针对南疆地区水资源供需现状，基于水资源、社会经济和生态环境三个方面，构建包含24个指标的南疆地区水资源承载力评价指标体系，基于熵权-TOPSIS法和耦合协调度模型，定量评价2005—2020年南疆地区水资源承载力和子系统间耦合协调度时空演化过程。结果表明：(1) 南疆地区水资源承载力水平整体偏低，巴州地区水资源承载力情况较好，阿克苏和喀什地区呈波动上升趋势。克州和和田地区整体呈先下降后缓慢上升趋势。(2) 南疆地区耦合协调度呈上升趋势，但处于低水平耦合阶段($0.2<D<0.5$)，其中巴州地区耦合协调度最高。(3) 南疆地区耦合协调度呈现东部优于中部和西部趋势，巴州地区耦合协调水平最好，克州地区上升较为缓慢，其余三地州变化速率相似，增长趋势稳定。

关键词：水资源承载力；耦合协调；水资源-社会经济-生态环境；南疆地区

水资源是推进西北干旱区社会经济和生态环境发展过程中一切问题的根源[1]。面对西北干旱区水资源研究的重点集中在水资源的脆弱性、优化配置和预测模拟等方向[2-4]，对水资源与社会经济和生态环境间协调发展的研究相对较少。目前，西北干旱区亟待解决的问题和面临的最大挑战之一，是如何平衡社会经济与水资源和生态环境间的关系，实现社会经济可持续发展[5]。水资源、社会经济及生态环境是一个复合系统，三者间相互制约、相互促进，水资源是社会经济发展和生态环境建设的基础，社会经济发展会消耗和破坏水资源和生态环境，生态环境的破坏反向影响水资源质量、制约社会经济发展。

水资源承载力是描述地区水资源支撑社会经济发展和生态环境建设规模的关键指标，国外学者对其专项研究较少，一般偏重于对水资源的规划和管理[6-8]、可持续利用[9-10]及水资源安全[11-12]等方面的研究。我国学者对水资源承载力的研究较晚，主要分为流域、地区和城市三大类研究，关于对新疆水资源承载力的研究，多为对地区和流域的研究，如喀什地区[13]、新疆[5]和塔里木河流域[14]等区域的水资源承载力评价，缺少针对南疆地区整体水资源承载力的研究。水资源承载力的研究方法很多，运用过程中各有不足，如模糊综合评价法计算较为复杂，在运算过程中容易忽略次要因素；系统动力学法对数据的需求量大，模型结构复杂；主成分分析法计算得到的综合评价结果不具有明确的意义，可比性较差[15-17]。相比之下，TOPSIS评价法在水资源承载力评价中应用最多[18-19]，方法已较为成熟，应用简便，利用原始数据充分，同时可充分考虑各评价要素间的关系。耦合协调度模型可以反映系统间的相互作用关系。国内关于水资源耦合协调的研究有经济-生态-社会系统[20]、城镇化-水资源系统[21]和社会经济-水资源系统[22]等。针对水资源-社会经济-生态环境耦合协调研究相对较少，如汪顺生等[23]、阳斌成等[24]和田培等[25]分别对河南省黄河流域、湖南省和长江中游城市群水资源、社会经济和生态环境间耦合协调度进行研究。研究区多是经济发展

收稿日期：2022-09-01； **修订日期：**2022-11-22
基金项目：自治区国土空间生态修复规划专题研究（二标段）新疆陆地生态系统修复策略和空间布局专题研究（202105140022）
作者简介：赵豫芝(1996-)，女，硕士研究生，主要研究方向为干旱区水资源可持续利用. E-mail: 1542879382@qq.com
通讯作者：杨建军. E-mail: yjjdfly@sina.com

较快的地区，对经济发展较为落后的西北干旱区的研究较少。

目前，针对南疆地区整体水资源承载力和水资源、社会经济和生态环境间耦合协调发展的研究鲜少报道。南疆地区属于典型的干旱和半干旱区，目前，水资源总量较为丰富，但地均水资源量少、水资源时空分布不均，加上较差的自然条件影响，南疆地区社会经济发展较为缓慢[26]。掌握水资源现状和水资源-社会经济-生态环境耦合协调发展规律，对科学规划水资源、推进南疆地区社会经济发展和生态文明建设具有重要意义。因此，本研究以南疆地区为研究对象，采用2005—2020年各地区统计数据，筛选水资源、社会经济和生态环境三个方面评价指标构建评价体系，采用熵权-TOPSIS法[27]和耦合协调度模型对南疆地区水资源承载力和耦合协调度进行研究。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南疆地区包括巴音郭楞蒙古自治州（巴州）、阿克苏地区、克孜勒苏克尔克孜自治州（克州）、喀什地区和和田地区，总面积达108.63×10^4 km^2，约占新疆总面积的65%，以山地和盆地为主，绿洲面积仅占3.76%[28]。生态环境基础薄弱，降雨稀少、沙漠面积大、可利用土地资源少、植被稀疏。2020年南疆地区常住人口达1195.17×10^{4}人，比2019年增长28.39%，占新疆总人数的46.23%。2020年南疆地区实现地区生产总值4127.12×10^{8}元，占全疆地区生产总值的29.9%。水资源总量为430.77×10^8 m^3，人均水资源量为3604.26 m^3·人$^{-1}$，整体上水资源量较丰富，但近年来，南疆地区经济发展迅速，工业占比增加，水资源开发利用程度已达到75.78%，处于开发利用过度状态，目前来看难以满足未来经济发展的需求[28]。

1.2 数据来源

人均水资源量、城镇登记失业率、造林面积、空气质量达到及优于二级的天数、供水模数和人均用水量数据来源于2005—2020年《新疆年鉴》；地表水资源占比、地下水开发利用程度、第一产业用水量、城市平均降雨量和居民生活用水数据主要来源于2010—2020年各地区《水资源公报》；人均生产总值、农村用电量、工业生产总值、第三产业占比、牧业产值和社会消费品零售总额数据来源于2005—2020年各地区《国民经济和社会发展统计公报》；生态环境用水量、城市人均公园绿地面积、化肥施用量、水土流失治理面积、城市垃圾处理率和城市污水处理率数据来源于2005—2020年《中国城市建设统计年鉴》，其中对个别缺失指标数据采用插值法进行赋值补缺。

2 研究方法

2.1 评价体系构建

依据已有研究，首先，水资源承载力与水资源的储量呈正相关关系，地区水资源的储量越多，水资源承载力越大，反之则越小[29-30]。基于此，对应南疆地区干旱少雨的气候特征，相对落后的水资源利用和处理设施，从水资源储量、开发利用情况、配置情况和利用效率四个方面选取人均水资源量、地表水资源量占比等8个指标作为水资源子系统。其次，水资源的使用量影响着水资源的储量，社会发展决定着水资源的使用效率，经济发展决定着水资源使用的速率，尤其是工农业的发展情况[31-32]。依据南疆地区的经济模式、居民生活情况和产业的发展状况，选取人均生产总值、城镇登记失业率等8个指标作为社会经济子系统。最后，水资源的质量决定水资源的用途，也是水资源承载力的影响因素，生态环境与水资源质量是相辅相成、互惠互利的[33]。考虑南疆地区生态环境基础较为薄弱，重点在于人们的改造和治理，选取能反映南疆各地区发展过程中对环境的治理力度、取得的成效和压力情况的8个指标作为生态环境子系统。结合人类活动的正、负影响情况构建南疆地区水资源-社会经济-生态环境评价指标体系（表1）。

2.2 基于面板数据的熵权-TOPSIS模型

熵权法是一种客观赋权方法，主要通过不同指标数据的离散程度来确定指标的权重，能够客观反映指标数据的差异。依据相关研究，本研究引用基于面板数据的熵权法计算南疆地区2005—2020年水资源承载力的评价体系权重[34-35]。计算步骤如下：

（1）数据标准化

本文构建评价体系中所选指标有正向和负向之分，正向指标具有极大值属性，负向指标则相反，为消除数据量纲不同的影响，利用极差法对数据进

表1　南疆地区水资源-社会经济-生态环境评价指标体系

Tab. 1　Water resources-socio-economic-ecological environment evaluation index system in southern Xinjiang

目标层	目标层权重	指标层	指标性质	指标权重
水资源	0.2383	人均水资源量/(m^3·人$^{-1}$)	正	0.0649
		地表水资源占比/%	正	0.0167
		供水模数/%	负	0.0360
		人均用水量/(m^3·人$^{-1}$)	负	0.0246
		地下水开发利用程度/%	负	0.0055
		第一产业用水/10^8 m^3	负	0.0404
		城市平均降雨量/mm	正	0.0442
		居民生活用水量/10^8 m^3	负	0.0060
社会经济	0.4494	城镇登记失业率/%	负	0.0374
		人均GDP/(元·人$^{-1}$)	正	0.0752
		农村用电量/(kW·h)	正	0.0599
		工业生产总值/10^4元	正	0.1120
		万元GDP用水量/m^3	负	0.0021
		第三产业占比/%	正	0.0268
		牧业产值/10^4元	正	0.0593
		社会消费品零售总额/10^4元	正	0.0767
生态环境	0.3123	生态环境用水量/10^8 m^3	正	0.0952
		造林面积/hm^2	正	0.0504
		城市人均公园绿地面积/hm^2	正	0.0365
		化肥施用量/t	负	0.0182
		水土流失治理面积/hm^2	正	0.0613
		城市垃圾处理率/%	正	0.0114
		空气质量达到及优于二级的天数/d	正	0.0185
		城市污水处理率/%	正	0.0208

行标准化处理。步骤如下：

首先将评价指标排列为如下矩阵：

$$X=\left(x_{ij}\right)_{m\times n} \tag{1}$$

正向指标公式为：

$$A_{ij}^{+}=\frac{x_{ij}-x_{\min j}}{x_{\max j}-x_{\min j}} \tag{2}$$

负向指标公式为：

$$A_{ij}^{-}=\frac{x_{\min j}-x_{ij}}{x_{\max j}-x_{\min j}} \tag{3}$$

式中：x_{ij}为第i个样本第j个指标的初始值；A_{ij}为第i个样本第j个指标的标准化值；$x_{\max j}$、$x_{\min j}$分别为相应指标对应的最大值和最小值；i=1，2，…，m；j=1，2，…，n；m，n分别为样本数和指标数。

（2）指标归一化

$$p_{ij}=\frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}A_{ij}} \tag{4}$$

（3）计算各个指标的熵值

$$e_i=-K\sum_{j=1}^{n}\left(p_{ij}\ln p_{ij}\right) \tag{5}$$

其中，$K=\dfrac{1}{\ln m\times v}$

（4）计算各个指标的权重

$$W_i=\frac{\left(1-e_i\right)}{\sum_{j=1}^{n}\left(1-e_i\right)} \tag{6}$$

式中：p_{ij}为第j个指标的特征比重；e_i为第j个指标的信息熵；K为玻尔兹曼常量；v为研究的年份数；W_i为第j个指标的权重。

（5）TOPSIS模型

TOPSIS模型是一种理想目标相似性的顺序优选技术，主要通过计算各评价指标与正、负理想解的距离和贴近度判断评价指标的优劣状况。贴近度的值越大，代表越接近理想值，评价的结果也就越好，反之，则越差。该模型可客观地反映区域资

源环境承载力的动态及变化趋势,其详细计算过程参考杨亮洁等[18]。

2.3 耦合协调度模型

耦合协调模型通常用于分析事物的协调发展水平。依据耦合协调度模型对系统耦合协调发展状况的评价优势,分析南疆地区水资源、社会经济和生态环境系统之间的耦合协调度,计算公式如下:

$$C=\frac{3\left(V_1\times V_2\times V_3\right)^{\frac{1}{3}}}{V_1+V_2+V_3} \tag{7}$$

$$T=\alpha V_1+\beta V_2+\gamma V_3 \tag{8}$$

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{9}$$

式中:D为耦合协调度;C为系统耦合度,介于0~1之间,C值越大,系统间协调水平越高,表明水资源、社会经济与生态环境间关系相互作用程度越强,反之,表明系统间相互作用越差;T为综合协调指数;V_1,V_2,V_3分别为系统各自评价值;α,β,γ为待定系数,且$\alpha+\beta+\gamma=1$。由于水资源、社会经济和生态环境间有密切的相互作用关系,因此各系统具有同等重要性,$\alpha=\beta=\gamma=1/3$。根据相关研究成果[25,36],结合南疆地区水资源、社会经济和生态环境间情况,对系统耦合等级进行划分,如表2所示。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力指标权重分析

通过公式(1)至(6)得出南疆地区水资源-社会经济-生态环境体系各指标的权重(表1)。结果显示,社会经济子系统所占权重(0.4494)大于水资源子系统和生态环境子系统,表明社会经济的发展是南疆地区水资源综合发展水平的主要影响因素,其中工业生产总值(0.112)、人均生产总值(0.0752)、牧业产值(0.593)和社会消费品零售总额(0.767)对南疆地区经济发展的影响力较大。生态环境子系统所占权重大于水资源子系统,表明生态环境是改善地区水资源综合发展水平过程中较为重要的影响因素,其中生态环境用水(0.0952)、造林面积(0.0504)和水土流失治理面积(0.0613)对地区生态环境的影响力较大。水资源子系统(0.2383)所占权重较低,其中人均水资源量(0.0649)对水资源子系统承载力的影响力较大。其余指标中,居民生活用水量(0.0060)和万元GDP用水量(0.0021)对水资源综合发展水平的影响力较小。

3.2 水资源承载力分析

运用熵权-TOPSIS模型,计算得到南疆地区2005—2020年水资源承载力、水资源子系统、社会经济子系统和生态环境子系统的综合评价值(图1)。

由图1可以看出,南疆地区五地州的水资源承载力变化情况,其中,巴州地区的水资源承载力较好,但变化浮动最大,由2005年的0.692不断下降,到2008年达到最低值0.425,2009年开始增长,2011年达到最大值0.702,2012—2016年水资源承载力波动较为频繁。近几年巴州地区水资源承载力综合评价值的波动幅度相对减小,且呈上升趋势;阿克苏和喀什地区水资源承载力整体呈波动上升趋势,两地区水资源承载力增长幅度相近,对比2005年,2020年阿克苏地区和喀什地区水资源承载力综合评价值,增长均超过40%。克州和和田地区水资源承载力整体呈现先波动下降后缓慢上升趋势,其中克州地区基于复杂的地理环境,经济基础较为薄

表2 耦合协调度等级划分

Tab. 2 Coupling coordination degree classification

综合协调类型	耦合协调值(D)	耦合协调等级	系统对比发展类型
严重不协调	(0~0.10]	极度失调衰退型	
	(0.10~0.20]	严重失调衰退型	
	(0.20~0.30]	中度失调衰退型	
基本不协调	(0.30~0.40]	轻度失调衰退型	
	(0.40~0.50]	濒临失调衰退型	在V_1、V_2、V_3中,V_1最小时为水资源可承载滞后型,V_2最小时为社会经济滞后型,V_3最小时为生态环境滞后型。
基本协调	(0.50~0.60]	勉强耦合协调型	
	(0.60~0.70]	初级耦合协调型	
	(0.70~0.80]	中级耦合协调型	
高级协调	(0.80~0.90]	良好耦合协调型	
	(0.90~1.00]	优质耦合协调型	

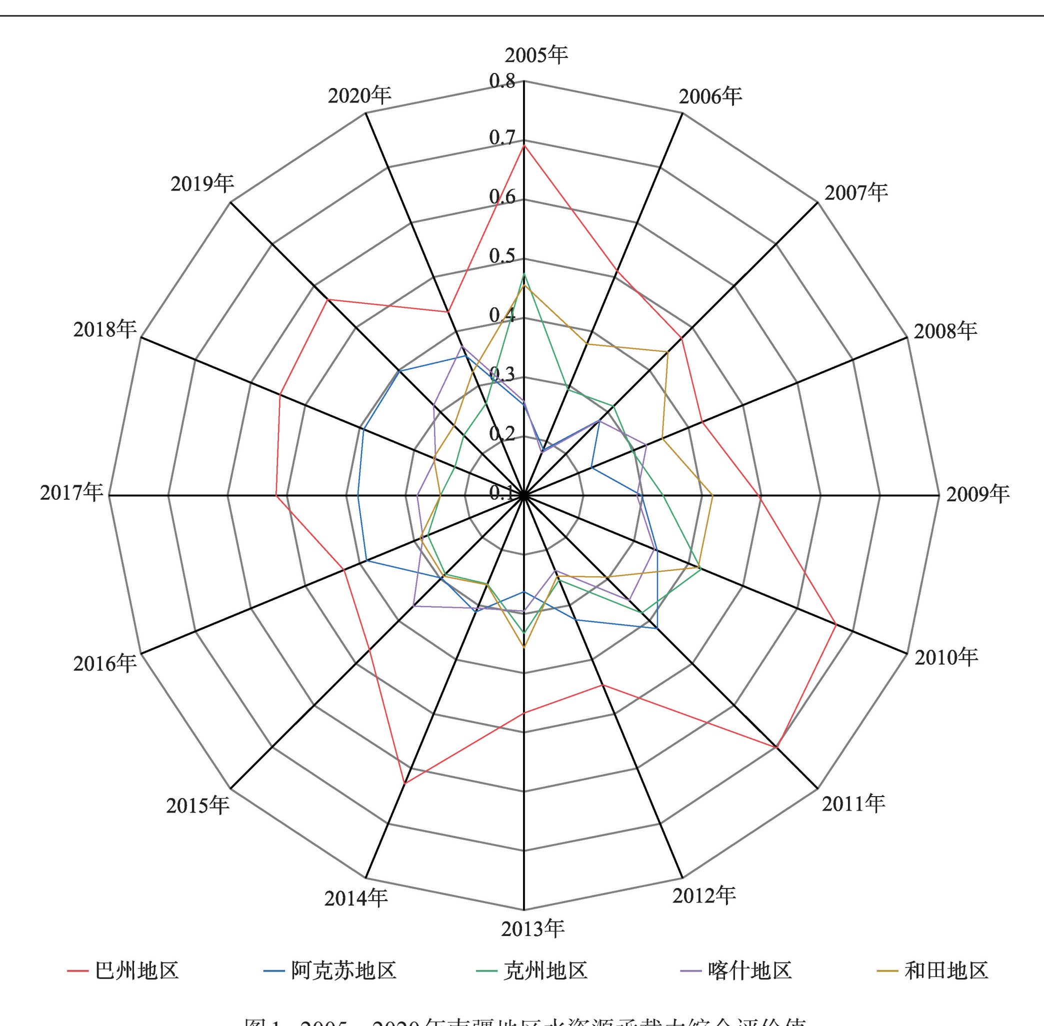


图1　2005—2020年南疆地区水资源承载力综合评价值

Fig. 1　The comprehensive evaluation value of water resources carrying capacity in the five prefectures of southern Xinjiang from 2005 to 2020

弱,发展较为缓慢。2018—2020年克州水资源承载力呈上升趋势。2017年之后,和田地区水资源承载力呈现稳定上升趋势。

3.3　南疆地区水资源-社会经济-生态环境耦合协调度分析

3.3.1　耦合协调度时间特征　利用公式(7)至(9),得到南疆地区五地州2005—2020年水资源-社会经济-生态环境3个子系统的综合评价指数 V_1、V_2、V_3,耦合度 C、协调指数 T 和耦合协调度 D,整体上南疆地区水资源-社会经济-生态环境系统耦合度较高,处于0.7以上。由图2可以看出,南疆地区水资源-社会经济-生态环境耦合协调度均呈现上升趋势,整体耦合协调度处于0.2~0.5之间,属于轻、中度失调衰退型和濒临失调衰退型,耦合协调度处于较低水平,说明水资源-社会经济-生态环境各子系统间关联程度较差。相比之下,巴州地区子系统间耦合协调度最高,由轻度失调衰退型上升至濒临失调衰退型。阿克苏地区整体变化幅度较大,2012年子系统间耦合协调度由中度失调衰退型上升至轻度失调衰退型,2016年子系统间耦合协调度由轻度失调衰退型下降为中度失调衰退型,2017年子系统间耦合协调度由中度失调衰退型上升至轻度失调衰退型。克州地区、喀什地区和和田地区整体变化幅度较小,呈现稳定的上升趋势,耦合协调度均由中度失调衰退型上升至轻度失调衰退型。

由图3可知,巴州地区2005年耦合协调水平最低,为0.350,属于轻度失调衰退型,2019年耦合水平最高,为0.454,属于濒临失调衰退型,2020年耦合协调度有了略微的下降,但仍属于濒临失调衰退型。整体上,巴州地区处于水资源系统滞后型,主要是因为社会经济和生态环境的发展对地区水资源的影响较大。阿克苏地区、克州地区、喀什地区

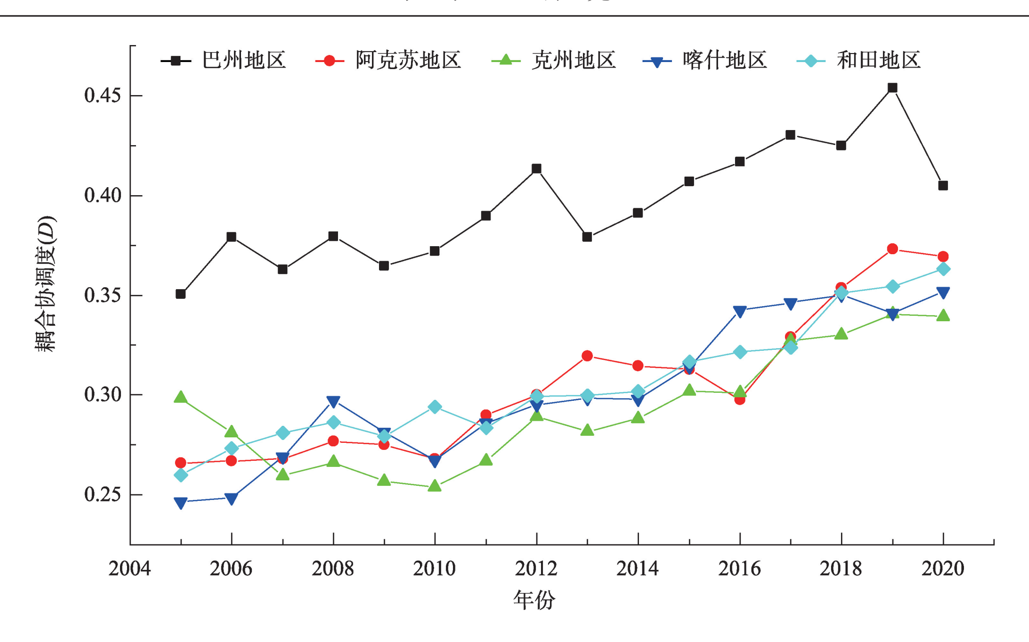


图2 南疆地区水资源-社会经济-生态环境耦合协调度

Fig. 2 Coupling coordination degree of water resources-socioeconomic-ecological environment in the five prefectures of southern Xinjiang

图3 南疆地区水资源-社会经济-生态环境系统对比时间变化

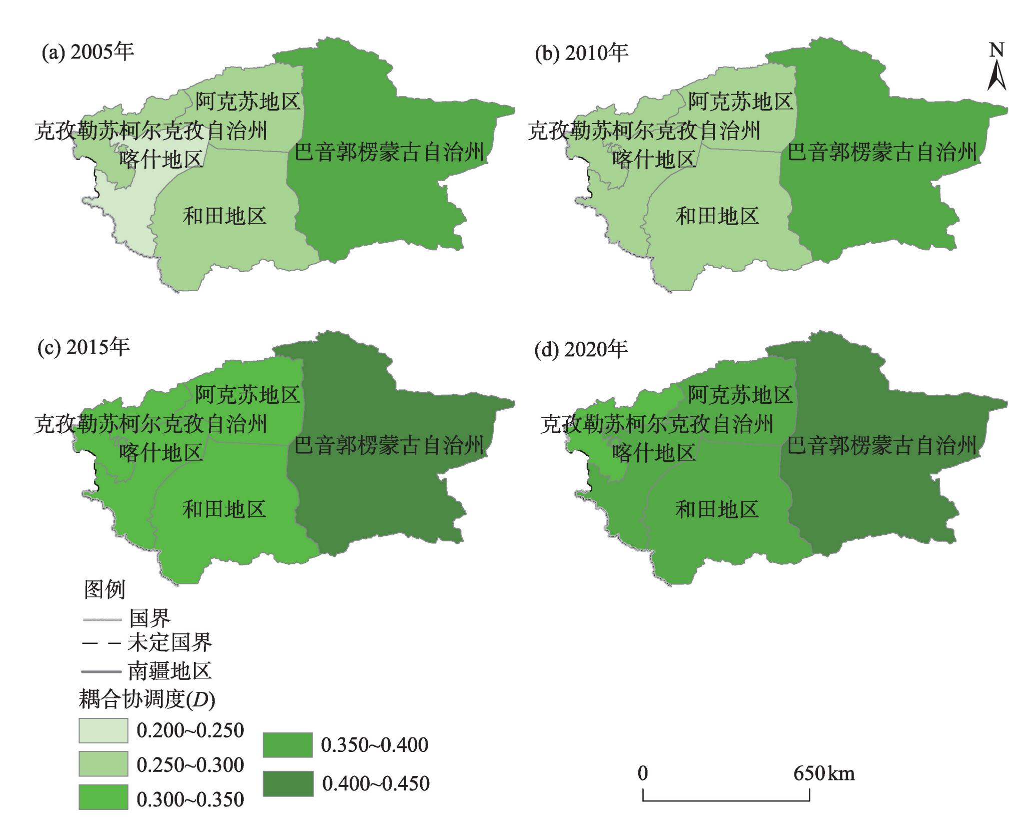
Fig. 3 Time changes of water resources-socioeconomic-ecological environment system in five prefectures of southern Xinjiang

和和田地区子系统间耦合协调度均由中度失调衰退型上升到轻度失调衰退型。阿克苏地区和喀什地区属于水资源滞后型,社会经济和生态环境的发展对水资源施加的压力较大。克州地区耦合协调度变化为先波动下降后持续上升趋势,属于社会经济和生态环境交互滞后型,2005—2015年属于社会经济滞后型,主要是因为地区各产业发展较为缓慢,人均生产总值、工业生产总值及牧业产值较低,城镇登记失业率较高。2015年以后社会经济发展速率提高,克州地区子系统间耦合协调转为生态环境滞后型。和田地区属于社会经济滞后型,总体上和田地区社会经济的发展较为缓慢,地区生产总值、工业生产总值及牧业产值等指标的增长趋势较缓。

3.3.2 耦合协调度空间分布特征　根据水资源承载力和耦合协调度的计算结果,结合ArcGIS空间分析技术选取2005年、2010年、2015年、2020年进行分析,得到南疆地区耦合协调度空间分布图(图4)。

由图4可知,南疆地区2005—2020年耦合协调度呈现上升趋势。处于东部的巴州地区耦合协调水平最高,位于中部的阿克苏地区、和田地区和西部的克州和喀什地区耦合协调水平较低。2005年巴州地区属于轻度失调衰退型,其他地区均为中度失调衰退型;2010年南疆地区耦合协调水平未变,但巴州、阿克苏、克州、喀什和和田地区耦合协调度均有了一定程度的提升;2015年南疆地区子系统间耦合协调度的提升幅度相对较大,巴州地区由轻度失调衰退型变为濒临失调衰退型,其他四地州由中度失调衰退型转变为轻度失调衰退型;2020年南疆地区耦合协调水平保持未变,但除克州外,其他四地州耦合协调度均相对有了明显的提升。

综上所述,南疆地区耦合协调度与地理位置有较强对应关系,水资源-社会经济-生态环境耦合协调程度表现为东部优于中部和西部趋势。巴州地区耦合协调水平最好,其他4个地区中,克州由于处于西部边界和复杂的地理环境使其耦合协调水平上升较为缓慢,阿克苏、喀什和和田地区的变化速率相似,增长趋势稳定。



注:底图采用新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图制作,审图号为新S(2021)047号,对底图边界无修改。

图4 南疆地区水资源-社会经济-生态环境耦合协调度空间变化

Fig. 4 Spatial change of the coupling coordination degree of water resources-socio-economic-ecological environment in southern Xinjiang

4 讨 论

本研究对南疆地区进行水资源承载力评价和子系统间耦合协调度分析，结果显示：南疆地区水资源承载力整体上呈现出先波动下降，后不同年份均呈上升的趋势，这与韦性如[28]的研究中，南疆地区五地州水资源承载力变化趋势一致，其原因可能是南疆地区脆弱的生态环境和较差的资源禀赋造成南疆地区水资源承载力偏低，加上在落后的基础设施建设和技术条件背景下发展社会经济，致使南疆地区水资源承载力呈现下降趋势。近年来国家对新疆的大力扶持和政策倾倒，加速了南疆地区的基础设施建设，产业发展及技术提升，提高了社会经济发展过程中资源利用率和回收率，因此水资源承载力呈现上升趋势，例如"一带一路"、"脱贫攻坚"和"增减挂钩"等政策的实施。本研究中巴州地区与其他四地州水资源承载力值差异较大，各地区间水资源承载力变化趋势存在一定差距，主要是因为巴州地区资源较为丰富，环境基础较好，经济发展也相对较快，其余地区间资源环境和经济发展重点不同，造成了水资源承载力的差异。该结果与热孜娅·阿曼等[37]的研究较为一致，但由于研究区域和指标体系的选取不同，本研究2004—2016年南疆地区五地州水资源承载力变化趋势与其存在一定的差异。陈红梅等[13]对喀什地区水资源承载力评价的研究显示，2005—2011年喀什地区水资源承载力呈现向好趋势，与本研究得出喀什地区水资源承载力的趋势一致。

与韦性如[28]建立的基于水资源储量、消耗、效益和回收的评价体系相比，本研究基于水资源、社会经济和生态环境三方面选取评价指标，利用耦合协调模型分析子系统间的耦合协调关系，能较为清晰的反映出水资源与社会经济和生态环境发展间的相互关系[38]，如阳斌成等[24]、田培等[25]和高志远等[39]利用耦合协调模型对湖南省、长江中游城市群和黄河流域水资源、社会经济和生态环境间的协调关系的研究中，取得较好的建模效果。但水资源、社会经济和生态环境是一个较为复杂的系统，基于数据获取的局限性，本研究未能更全面的对地区水资源利用的数据进行收集，如牧业用水量、工业污水排放量等。社会经济和生态环境子系统的影响因素很多，在后期研究中指标体系需进一步完善，使研究结果与实际情况更贴合，以制定出准确的规划和措施。

5 结 论

本研究应用熵权-TOPSIS模型方法和耦合协调度模型分别评价南疆地区水资源承载力和水资源-社会经济-生态环境耦合协调发展状况，主要的结论如下：

（1）南疆地区水资源承载力水平整体偏低，巴州地区的水资源承载力情况较好，但波动幅度大，变化趋势不稳定。阿克苏和喀什地区水资源承载力整体呈波动上升趋势，增长幅度相近。对比2005年，2020年两地区水资源承载力综合评价值增长均超过40%。克州和和田地区水资源承载力整体呈现先波动下降后缓慢上升趋势，其中和田地区水资源承载力波动幅度较大。

（2）2005—2020年南疆地区水资源-社会经济-生态环境处于低水平耦合阶段，表示各子系统间关联程度较差，2020年耦合协调度由严重不协调过渡到基本不协调阶段，整体呈上升趋势，且上升空间较大。其中巴州地区子系统间耦合协调水平最好，由轻度失调衰退型上升至濒临失调衰退型。其他四地州耦合协调水平均由中度失调衰退水平上升至轻度失调衰退水平。结合水资源、社会经济和生态环境子系统综合评价值，巴州地区、阿克苏地区和喀什地区属于水资源滞后型，克州地区属于社会经济和生态环境交互滞后型，和田地区属于社会经济滞后型。

（3）从空间上看，基于地理位置差异，南疆地区耦合协调度与其有较强对应关系，水资源-社会经济-生态环境耦合协调程度表现为东部优于中部和西部趋势。巴州地区耦合协调水平最好，其他4个地区中，克州由于处于西部边界和复杂的地理环境使其耦合协调水平上升较为缓慢，阿克苏、喀什和和田地区的变化速率相似，增长趋势稳定。

参考文献(References)：

[1] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价——以石河子垦区为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 847-856. [Zhang Zhijun, Chen Fulong, Long Aihua, et al. Assessment of water resource security in an arid area based on an extension cloud model: A case study of Shihezi District[J]. Arid Zone

Research, 2020, 37(4): 847−856.]

[2] 孙桂丽, 陆海燕, 郑佳翔, 等. 新疆生态脆弱性时空演变及驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 258−269. [Sun Guili, Lu Haiyan, Zheng Jiaxiang, et al. Spatio-temporal variation of ecological vulnerability in Xinjiang and driving force analysis[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 258−269.]

[3] 黄磊, 邵超峰, 鞠美庭, 等. 西北地区小城镇水资源承载力评估及发展模式设计——以国家生态移民扶贫开发区红寺堡区为例[J]. 生态经济, 2015, 31(5): 146−149, 169. [Huang Lei, Shao Chaofeng, Ju Meiting, et al. Water resources carrying capacity assessment and development mode design of small town in Northwest: A case study of Hongsipu area[J]. Ecological Economy, 2015, 31(5): 146−149, 169.]

[4] 戴文渊, 郭武, 郑志祥, 等. 石羊河流域水生态安全影响因子及驱动机制研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1555−1563. [Dai Wenyuan, Guo Wu, Zheng Zhixiang, et al. Water ecological security influence factor and driving mechanism research in Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1555−1563.]

[5] 胡宝华, 晁伟鹏, 喻晓玲. 干旱区水资源承载力空间布局研究——以新疆为例[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(8): 1093−1098. [Hu Baohua, Chao Weipeng, Yu Xiaoling. Research on spatial layout of water resources carrying capacity in arid area: A case study in Xinjiang[J]. Resource Development and Market, 2018, 34(8): 1093−1098.]

[6] Rjiv G, Gaurav K. Scenario planning for water resource management in semi arid zone[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2017, 105: 290−299.

[7] Turner S, Jeffrey P J. A simple drought risk analysis procedure to supplement water resources management planning in England and Wales[J]. Water and Environment Journal, 2020, 35(1): 417−424.

[8] Miller K A, Belton V. Water resource management and climate change adaptation: a holistic and multiple criteria perspective[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2014, 19(3): 289−308.

[9] Macdonald G. Roadmap for sustainable water resources in southwestern North America[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(50): 21300−21305.

[10] Mitsuteru I, Sena T, Jamila T, et al. Trial production of porous ceramics filter made from sediments in water reservoirs for sustainable use of surface water resource in arid land[J]. International Journal of Environmental Science and Development, 2017, 8(8): 549−556.

[11] Julio Natalia, Figueroa Ricardo, Ponce Oliva Roberto D. Water resources and governance approaches: Insights for achieving water security[J]. Water, 2021, 13(21): 3063.

[12] Marganingrum D. Carrying capacity of water resources in Bandung Basin[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 118(1): 012026.

[13] 陈红梅, 李青, 田宝龙. 干旱区城镇化与水资源承载力协调性分析——以国家级经济开发区喀什为例[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(5): 573−577. [Chen Hongmei, Li Qing, Tian Baolong. Urbanization and water resources carrying capacity analysis of coordination in arid areas: A case study in national economic development of Kashi[J]. Resources Development & Market, 2015, 31(5): 573−577.]

[14] 刘夏, 张曼, 徐建华, 等. 基于系统动力学模型的塔里木河流域水资源承载力研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1407−1416. [Liu Xia, Zhang Man, Xu Jianhua, et al. Water resources carrying capacity of Tarim River Basin based on system dynamics model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1407−1416.]

[15] 段新光, 栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 119−122. [Duan Xinguang, Luan Fangfang. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang based on Fuzzy comprehensive model[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S1): 119−122.]

[16] 卢方园, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 库布齐沙漠社会经济系统动态仿真及其应用[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1102−1111. [Lu Fangyuan, Jia Debin, Gao Ruizhong, et al. Dynamic simulation and carrying capacity analysis of a water resource system in Kubuqi Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1102−1111.]

[17] 曹丽娟, 张小平. 基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 906−912. [Cao Lijuan, Zhang Xiaoping. Assessment of water resources carrying capacity in Gansu Province based on principal component analysis[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 906−912.]

[18] 杨亮洁, 杨永春. 甘肃省资源环境承载力时空分异[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 7000−7017. [Yang Liangjie, Yang Yongchun. The spatiotemporal variation in resource environmental carrying capacity in the Gansu Province of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 7000−7017.]

[19] 何刚, 夏业领, 秦勇, 等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 287−292, 300. [He Gang, Xia Yeling, Qin Yong, et al. Evaluation and spatial-temporal dynamic change of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 287−292, 300.]

[20] 王岳, 刘学敏, 哈斯额尔敦. 荒漠化治理"经济-生态-社会"效益耦合协调度时空分异及其驱动因素——以毛乌素沙地为例[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1224−1237. [Wang Yue, Liu Xuemin, Hasi Erdun. Spatiotemporal differentiation and driving factors of coupling coordination degree of economic-cological-social benefits from desertification controlin the Mu Us Sandy Land[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1224−1237.]

[21] 钞锦龙, 李乐乐, 杨朔, 等. 汾河流域城市化与水资源耦合协调关系研究[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 487−496. [Chao Jinlong, Li Lele, Yang Shuo, et al. Coupling and coordination relationship between Urbanization and water resources in the Fenhe River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 487−496.]

[22] 杨胜苏, 张利国, 喻玲, 等. 湖南省社会经济与水资源利用协调

发展演化[J]. 经济地理, 2020, 40(11): 86−94. [Yang Shengsu, Zhang Liguo, Yu Ling, et al. The coordinated development and evolution of social economy and water resources utilization in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2020, 40(11): 86−94.]

[23] 汪顺生, 杨金月, 王爱丽, 等. 河南省黄河流域水资源-经济-生态系统耦合协调评价及预测[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 919−934. [Wang Shunsheng, Yang Jinyue, Wang Aili, et al. Evaluation and forecast of coupling coordination of water resources, economy and ecosystem in the Yellow River Basin of Henan Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(3): 919−934.]

[24] 阳斌成, 张家其, 罗伟聪, 等. 基于TOPSIS及耦合协调度的湖南省2009−2018年水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 357−364. [Yang Bincheng, Zhang Jiaqi, Luo Weicong, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Hu'nan Province during 2009−2018 based on TOPSIS and coupling coordination development[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 357−364.]

[25] 田培, 王瑾钰, 花威, 等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1871−1884. [Tian Pei, Wang Jinyu, Hua Wei, et al. Spatial-temporal pattern and coupling coordination of water resources carrying capacity in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1871−1884.]

[26] 刘建军. 南疆地区水资源保障问题和对策分析[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(8): 8−11, 5. [Liu Jianjun. Problems and countermeasures of water resources guarantee in South Xinjiang[J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(8): 8−11, 5.]

[27] 吉婷婷, 陈童, 毛广雄. 基于熵权Topsis的淮河生态经济带水资源承载力评价[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(9): 130−135. [Ji Tingting, Chen Tong, Mao Guangxiong. The assessment on water resources capacity in Huaihe Economic Belt based on entropy weight and Topsis method[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(9): 130−135.]

[28] 韦性如. 南疆地区城镇化与水资源承载力研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020. [Wei Xingru. Urbanization and Water Resources Carrying Capacity in Southern Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.]

[29] 何伟, 陈素雪, 仇泸毅. 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的综合评价及时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1208−1219. [He Wei, Chen Suxue, Qiu Luyi. Comprehensive evaluation and spatial-temporal evolution of water resources carrying capacity in three Gorges ecological and economy corridor of Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(6): 1208−1219.]

[30] 徐政华, 曹延明. 基于熵权TOPSIS模型的长春市水资源承载力评价[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2900−2907. [Xu Zhenghua, Cao Yanming. Application of TOPSIS method based on weight evaluation of water resources carrying capacity in Changchun City[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2900−2907.]

[31] 张凯, 陆海曙, 陆玉梅. 三重属性约束的承载力视角下中国省际水资源利用效率测度[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1778−1793. [Zhang Kai, Lu Haishu, Lu Yumei. Measurement of inter-provincial Water Resources use efficiency in China from the Perspective of carrying capacity with triple attribute constraints[J]. Resources Science, 2021, 43(9): 1778−1793.]

[32] 刘朝露, 陈星, 崔广柏, 等. 临海市水资源承载力动态变化及驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 46−52. [Liu Chaolu, Chen Xing, Cui Guangbai, et al. Analysis on dynamic change and driving factors of water resources carrying capacity in Linhai City, China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(1): 46−52.]

[33] 杜俊平, 叶得明, 陈年来. 基于可拓综合评价法的干旱区水资源承载力评价——以河西走廊地区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(12): 56−63. [Du Junping, Ye Deming, Chen Nianlai. Evaluation of water resources carrying capacity in Arid areas based on extension comprehensive evaluation method: A case study in Hexi Corridor[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(12): 56−63.]

[34] 李扬杰, 张莉. 基于全局熵值法的长江上游地区产业生态化水平动态评价[J]. 生态经济, 2021, 37(7): 44−48, 56. [Li Yangjie, Zhang Li. Dynamic evaluation of industrial ecologization level in the upper reaches of the Yangtze River based on overall entropy method[J]. Ecological Economy, 2021, 37(7): 44−48, 56.]

[35] 赵瑞芬, 王小娜. 基于全局熵值法的京津冀区域创新能力比较[J]. 中国流通经济, 2017, 31(4): 114−121. [Zhao Ruifen, Wang Xiao'na. Comparison of regional innovative abilities in Beijing-Tianjing-Hebei area based on overall entropy method[J]. China Business and Market, 2017, 31(4): 114−121.]

[36] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 80−86. [Wang Fuqiang, Ying Zhuohui, Lyu Subing, et al. Evaluation of the characteristics of coupling coordinated development of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 80−86.]

[37] 热孜娅·阿曼, 方创琳, 赵瑞东. 新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1576−1585. [Reziya Aman, Fang Chuanglin, Zhao Ruidong. Research on the water resources carrying capacity and spatial-temporal characteristics in Xinjiang[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7): 1576−1585.]

[38] Zhang J, Dong Z. Assessment of coupling coordination degree and water resources carrying capacity of Hebei Province (China) based on WRESP2D2P framework and GTWR approach[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 82: 103862.

[39] 高志远, 程柳, 张小红. 黄河流域经济发展-生态环境-水资源耦合协调水平评价[J]. 统计与决策, 2022, 38(9): 123−127. [Gao Zhiyuan, Cheng Liu, Zhang Xiaohong. Evaluation of the coupling level of economic development-ecological environment-water resources in the Yellow River Basin[J]. Statistics and Decision, 2022, 38(9): 123−127.]

Spatio-temporal pattern of water resource carrying capacity, coupling and coordination of subsystems in southern Xinjiang

ZHAO Yuzhi, YANG Jianjun

(School of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: The contradiction between supply and demand of congenital water shortage and acquired water supply in southern Xinjiang stems from the natural accumulation over time and the effects of human long-term production activities on the ecological environment, including its destruction. It is necessary to formulate a scientific and perfect water use plan to improve the contradiction between supply and demand. In order to assess the current state of water supply and demand in southern Xinjiang, a water resource carrying capacity evaluation index system based on the three aspects of water resources, social economy, and ecological environment was constructed using 24 indicators. The spatio-temporal evolution of water resource carrying capacity and coupling coordination between subsystems in southern Xinjiang from 2005 to 2020 was quantitatively evaluated based on the entropy weight-TOPSIS method and coupling coordination model. The results show that: (1) The overall carrying capacity of water resources in southern Xinjiang is low, and the carrying capacity of water resources in Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture is good, however, the variation range is wide and the trend is unsteady. The overall carrying capacity of water resources in the Aksu and Kashgar regions showed a fluctuating upward trend, with similar growth rates. Compared with 2005, the comprehensive evaluation value of water carrying capacity in the two regions increased by more than 40% in 2020. The overall water carrying capacity of Kyzylsukol Autonomous Prefecture and the Hotan area showed a fluctuating and decreasing trend first and then slowly rising. The water carrying capacity of resources in the Hotan area fluctuated greatly. (2) From 2005 to 2020, the water-socio-economic-ecological environment in southern Xinjiang was in a low-level coupling stage, indicating that the degree of correlation between various subsystems was poor, and in 2020, the coupling coordination degree transitioned from serious uncoordinated to the basic uncoordinated stage, showing an overall upward trend and large upward space. Among them, Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture has the best level of coupling and coordination between subsystems, and the type of mild dysregulation recession has increased from the mild dysregulated recession type to the endangered dysregulated recession type. The coupling coordination level in the other four states increased from the level of moderate imbalance recession to the level of mild imbalance recession. Combined with the comprehensive evaluation values of water resources, socio-economic and ecological environment subsystems, Bayingol Mongol Autonomous Prefecture, Aksu region, and Kashgar region belong to the water resources lagging type. Kyzylsukol Autonomous Prefecture belongs to the socio-economic and ecological environment interaction lag type, and Hotan area belongs to the socio-economic lag type. (3) From the perspective of space, based on geographical differences, the coupling and coordination degree of the five prefectures in southern Xinjiang has a strong correspondence with it. The coupling coordination degree of water resources-socio-economic-ecological environment is better in the east than in the central and western regions. Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture has the best level of coupling and coordination, and among the other four regions, Kyzylsukol Autonomous Prefecture has a slow increase in coupling and coordination due to its western border and complex geographical environment, while Aksu, Kashgar, and Hotan regions have similar change rates and stable growth trends.

Keywords: water resources carrying capacity; coupling coordination; water resources-socioeconomic-ecological environment; southern Xinjiang